

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСЕВДООРТОГОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УРОВНЯ ШУМА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ С БОЛЬШИМ ПОГЛОЩЕНИЕМ

© 2019 г. Е.Г. Базулин^{1,*}, В.К. Авагян²

¹ООО «Научно-производственный центр «ЭХО+», Россия 123458 Москва, ул. Твардовского, 8,
Технопарк «Строгино»

²Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Россия 111250
Москва, ул. Красноказарменная, 14
E-mail: *bazulin@echoplus.ru

Поступила в редакцию 25.03.2019; после доработки 25.04.2019

Принята к публикации 26.04.2019

Для повышения отношения сигнал/шум при контроле материалов с высоким уровнем поглощения предложено использовать в качестве зондирующих сигналов сложные сигналы, сформированные на основе кодовых наборов, применяемых в технологии Code Division Multiple Access (CDMA). Кодовые последовательности кодового набора обладают низким уровнем функции взаимной корреляции и дельта-подобной функцией автокорреляции. Эхосигналы регистрируются методом двойного сканирования, когда элементы антенной решетки последовательно излучают уникальные зондирующие фазоманипулированные согласно коду Касами сигналы, а регистрация эхосигналов происходит одновременно всеми элементами антенной решетки на каждом такте излучения. Так как форма «боковых лепестков» сжатых эхосигналов для каждого выстрела разная, то восстановление изображения отражателей методом цифровой фокусировки антенны (ЦФА) приведет к уменьшению уровня «боковых лепестков». В результате их уровень при использовании для каждого элемента антенной решетки разных кодовых последовательностей длиной 15 может оказаться меньше, чем при использовании для всех элементов одной последовательности длиной 63. Восстановление ЦФА-изображения при сканировании антенной решеткой при условии, что для каждого положения используется уникальный кодовый набор, должно дополнительно уменьшить уровень шума и уровень «боковых лепестков». В модельном эксперименте по восстановлению изображения отверстий бокового сверления в плексигласовом образце СО-1 продемонстрирована эффективность предложенного подхода при использовании кодов Касами длиной 15 и 63.

Ключевые слова: ультразвуковой неразрушающий контроль, двойное сканирование, тройное сканирование, цифровая фокусировка антенной (ЦФА), метод максимальной энтропии (МЭ), C-SAFT, высокое поглощение, Code Division Multiple Access (CDMA).

DOI: 10.1134/S0130308219080013

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в практике ультразвукового контроля (УЗК) широко применяются дефектоскопы, использующие антенные решетки. Для восстановления изображения отражателей в объекте контроля используются две технологии: технология фазированных антенных решеток (ФАР) [1], которая на сегодняшний день является наиболее распространенной, и технология цифровой фокусировки антенной (ЦФА) [2, 3]. В статье [4], посвященной сравнению возможностей ФАР- и ЦФА-дефектоскопов, сделан вывод, что ЦФА-технология более перспективна с алгоритмической точки зрения и поэтому статья посвящена обработке эхосигналов, измеренных ЦФА-дефектоскопами.

Рассмотрим работу ЦФА-дефектоскопа подробнее. На первом этапе эхосигналы измеряются при излучении и приеме всеми комбинациями пар элементов антенной решетки [5]. В [6] такой режим регистрации эхосигналов называется режимом двойного сканирования, а в [7] — режимом Full Matrix Capture (FMC). Регистрацию эхосигналов антенной решеткой, работающей в режиме двойного сканирования, при ее механическом перемещении будем называть режимом тройного сканирования [6]. На втором этапе по измеренным эхосигналам изображение отражателей восстанавливается методом Combined Synthetic Aperture Focusing Technique (C-SAFT) [5, 8], который можно модифицировать для учета многолучевого распространения ультразвука в объекте контроля с неровными границами и при наличии областей с разными акустическими свойствами [9]. В зарубежной литературе алгоритм C-SAFT называется Total Focusing Method (TFM) [7]. Возможность совместной когерентной обработки эхосигналов методом C-SAFT для разных положений антенной решетки позволяет получать высококачественное изображение отражателей, что принципиально отличает ЦФА-дефектоскопы от ФАР-дефектоскопов [4].

В практике УЗК одним из источников белого шума является аппаратный шум приемных усилителей, который затрудняет выделение полезного сигнала из шума при контроле материалов с высоким уровнем поглощения. Для снижения уровня белого шума можно многократно регистрировать

эхосигналы в одном положении антенной решетки и усреднять их. При таком подходе амплитуда белого шума будет расти пропорционально корню квадратному из числа парциальных изображений, а амплитуда полезных эхосигналов будет возрастать пропорционально числу парциальных изображений [10]. Получить требуемое отношение сигнал/шум можно за счет многократных измерений эхосигналов и их усреднений, но время регистрации эхосигналов также многократно возрастет.

Для снижения уровня белого шума можно регистрировать сигналы в режиме тройного сканирования. Для каждого положения антенной решетки восстанавливаются парциальные ЦФА-изображения, которые для получения итогового изображения когерентно складываются [11]. Далее по тексту просуммированное изображение будет называться ЦФА-Х-изображение. При таком подходе количество положений, в которых регистрируются эхосигналы, рассеянные отражателем, будет ограниченным. Поэтому при шаге сканирования в несколько миллиметров будет существовать предел для повышения отношения сигнал/шум.

Работа со сложными сигналами позволяет повысить отношение сигнал/шум при формировании изображений отражателей в объектах с высоким поглощением [12] без увеличения времени регистрации эхосигналов. Так, в практике ультразвукового контроля используются линейные частотно-модулированные сигналы [13], сигналы, фазоманипулированные согласно коду Баркера [11] или псевдослучайной последовательности [12] длиной N_c . Для получения качественного изображения отражателей нужно добиться того, чтобы при сжатии сложных сигналов уровень «боковых лепестков» функции автокорреляции сложного сигнала был предельно малым, как минимум меньше -20 дБ. Так как он пропорционален $1/\sqrt{N_c}$, то, увеличивая длину сложного сигнала, можно получить требуемое значение уровня «боковых лепестков», но при этом увеличится размер «мертвой зоны», в пределах которой не удастся восстановить изображения отражателей. Существуют комплементарные последовательности Голя (Golay) [14] и наборы дополнительных кодов Велти (Welch) [11], корреляционная функция которых имеет низкий уровень «боковых лепестков», пропорциональный $1/N_c$. Отметим, что применение комплементарных кодов приводит к удвоению времени регистрации эхосигналов.

Для технологии Code Division Multiple Access (CDMA), используемой в мобильной телефонии, были разработаны специальные кодовые наборы сигналов $\{s_n(t)\}_{n=1}^{N_e}$, которые обладают свойством псевдоортогональности, то есть функция автокорреляции сигнала $s_n(t)$ в идеале стремится к δ -функции, а функция взаимной корреляции между разными сигналами кодового набора близка к нулю. Кодовые наборы последовательностей Касами (Kasami) [15], Голда (Gold) [16], де Брейна (de Bruijn) [17], Задова-Чу (Zadoff-Chu) [18] обладают свойством псевдоортогональности. Элемент кодовой последовательности называется чипом.

Пусть каждый элемент номер n антенной решетки элементов излучает свой зондирующий фазоманипулированный сигнал из набора $\{s_n(t)\}_{n=1}^{N_e}$, а принимают эхосигналы все N_e элементов. Набор из N_e измеренных эхосигналов называется выстрелом. Обозначим через $p_{n,m}(t; s_n(t))$ эхосигнал, измеренный элементом номер m антенной решетки при излучении зондирующего сигнала $s_n(t)$, элементом номер n . После сжатия эхосигналов каждого выстрела со своим зондирующим импульсом $s_n(t)$ функции автокорреляции будут иметь «боковые лепестки» разной формы с амплитудой, равной примерно $1/\sqrt{N_c}$ от максимума амплитуды функции автокорреляции. При формировании ЦФА-изображения уровень ложных бликов, вызванных наличием «боковых лепестков» у сжатых сигналов, должен уменьшиться в $1/\sqrt{N_c N_e}$, то есть, применяя короткий код длиной 15, можно получить уровень «боковых лепестков», характерный для сложного сигнала длиной 63 периода.

Распространенным методом сжатия сложных эхосигналов является согласованная фильтрация эхосигнала $p_{n,m}(t; s_n(t))$ с зондирующим импульсом $s_n(t)$. Можно провести сжатие сложных эхосигналов за счет фазовой коррекции в полосе частот Δf спектра измеренного сигнала $p_{n,m}(f; s_n(t))$

$$\tilde{p}_{n,m}(t) = \int_{\Delta f} p_{n,m}(f; s_n(t)) \frac{s_n^*(f)}{|s_n(f)|} e^{-i2\pi f t} df, \quad (1)$$

где $s_n^*(f)$ — комплексно сопряженный спектр зондирующего сигнала $s_n(t)$. Но и при таком способе сжатия уровень «боковых лепестков» будет пропорционален $1/\sqrt{N_c}$. Такие алгоритмы сжатия сложных сигналов обладают высоким быстродействием, но не позволяют получить низкий уровень «боковых лепестков» и достичь эффекта сверхразрешения.

Более сложный метод декодирования или деконволюции простых или сложных сигналов, позволяющий уменьшить уровень «боковых лепестков» более чем в $\sqrt{N_c}$ раз и уменьшить длительность эхосигналов, основан на использовании метода максимальной энтропии (МЭ) [19].

1. ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ «БОКОВЫМИ ЛЕПЕСТКАМИ» ЦФА-ИЗОБРАЖЕНИЯ

1.1. Использование нескольких кодовых наборов для разных положений антенной решетки

Как отмечалось выше, для увеличения пространственной апертуры излучения-приема эхосигналы можно измерять в режиме тройного сканирования. Изображение отражателей можно получить когерентно, сложив N_w парциальных ЦФА-изображений [3], восстановленных для каждого положения антенной решетки. В этом случае уровень «боковых лепестков» можно дополнительно уменьшить, используя для каждого положения антенной решетки свой кодовый набор

$$\left\{ \left\{ s_{n,w}(t) \right\}_{n=1}^{N_e} \right\}_{w=1}^{N_w} = \left\{ s_{n,1}(t) \right\}_{n=1}^{N_e}, \left\{ s_{n,2}(t) \right\}_{n=1}^{N_e}, \dots, \left\{ s_{n,N_w}(t) \right\}_{n=1}^{N_e}. \quad (2)$$

При использовании такого приема можно ожидать, что уровень ложных бликов ЦФА-Х-изображения, сформированных «боковыми лепестками», будет равен $1/\sqrt{N_c N_e N_w}$. Для случаев $N_c = 15$, $N_e = 32$ и $N_w = 10$ уровень «боковых лепестков» должен составить величину примерно -37 дБ.

1.2. Использование сплит-сигналов

Уменьшить уровень ложных бликов ЦФА- или ЦФА-Х-изображения можно, увеличивая длину N_c кодовой последовательности, но при этом будет увеличиваться размер «мертвой зоны». Для разрешения этого противоречия можно воспользоваться сплит-сигналами [13], которые представляют собой последовательность из N_{split} радиоимпульсов, смещенных относительно друг друга на один измерительный такт дефектоскопа. Применение сплит-сигналов позволяет за счет заданного числа N_{split} добиться дополнительного повышения отношения сигнал/шум в $\sqrt{N_{split}}$ раз. Например, при излучении сплит-сигнала из четырех $N_{split} = 4$ разных зондирующих импульсов длиной $N_c = 15$ можно добиться того же уровня «боковых лепестков», как при излучении кодовой последовательности длиной $N_c = 63$, но при этом размер «мертвой зоны» будет такой же, как если бы излучался сложный сигнал длиной $N_c = 15$. К сожалению, при таком подходе время регистрации эхосигналов возрастает в N_{split} раз.

2. ВЫБОР КОДОВЫХ НАБОРОВ

Как упоминалось ранее, для технологии CDMA разработано несколько типов кодовых наборов из последовательностей длиной N_c , которые обладают свойствами псевдоортогональности. Закон изменения фазы каждого периода фазоманипулированного зондирующего импульса может определяться кодами Касами (Kasami) [15], Голда [16], де Брейна [17], у которых фаза чипа может принимать значения либо 0, либо 180 градусов. Можно использовать последовательности Задова—Чу [18], имеющие фазу каждого чипа в диапазоне от -180 до 180 градусов. Набор последовательностей со случайной фазой также может рассматриваться как псевдоортогональный. Фазоманипулированный сигнал можно формировать на несущей частоте f_c , а возможен вариант случайного измерения частоты $f_c + \delta f$ от чипа к чипу [20], как это делается в технологии FH-CDMA. Для излучения такого рода сигналов к излучающему генератору дефектоскопа предъявляются повышенные требования по сравнению с обычным генератором ударного возбуждения.

Наборы зондирующих сигналов для модельных экспериментов выбирались следующими. Для кодов Касами длиной 15 и 63 генерировалось $N_w = 100$ кодовых наборов $\left\{ \left\{ s_{n,w}(t) \right\}_{n=1}^{N_e} \right\}_{w=1}^{N_w}$, в каждом из которых было по $N_e = 32$ зондирующих сигналов. Затем простейшим способом рассчитывались эхосигналы $p_{n,m}(t, s_n(t))$ от точечного отражателя в предположении точечных излучателей и приемников антенной решетки. В каждом ЦФА-изображении отражателя отношение сигнал/шум оценивалось как отношение первого максимума ко второму. После такой оценки выбирались 20 кодовых наборов, по которым были получены ЦФА-изображения с лучшим отношением сигнал/шум.

3. МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ОБРАЗЦЕ СО-1

Модельные эксперименты проводились с использованием ЦФА-дефектоскопа «АВГУР АРТ», с помощью которого можно излучать сложные сигналы заданной формы. Дефектоскоп разработан и изготавливается в Научно-производственном центре «ЭХО+» [21].

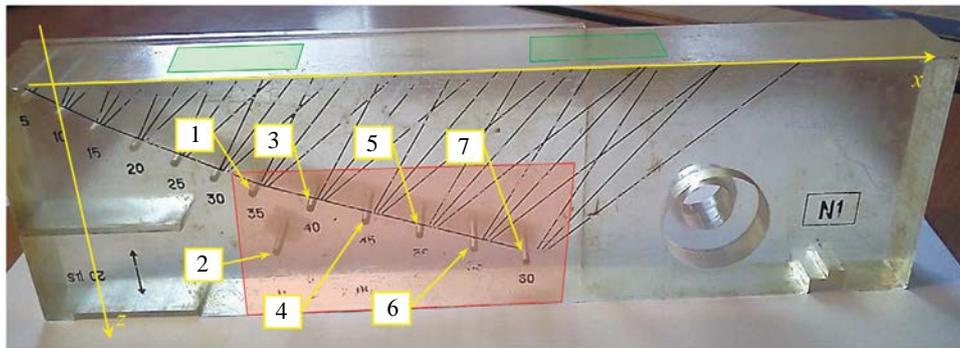


Рис. 1. Фотография образца СО-1.

На рис. 1 показана фотография образца СО-1. Два многоугольника зеленого цвета схематично показано начальное (слева) и конечное (справа) положения антенной решетки при перемещении ее 40 раз вдоль оси x с шагом 1,96 мм. Отверстия бокового сверления, изображения которых восстанавливались, пронумерованы и указаны выносками с номерами от 1 до 7. Для регистрации эхосигналов в режиме тройного сканирования использовалась антенная решетка (5 МГц, 32 элемента, размер пьезоэлемента $0,5 \times 10$ мм, зазор между краями элементов 0,1 мм) без призмы. Амплитуда зондирующих сигналов всех типов была равна 50 В. Малые размеры пьезоэлементов и невысокое напряжение зондирующего импульса специально выбраны для того, чтобы при использовании простых сигналов отношение сигнал/шум изображения отверстий боковых сверлений при контроле на однократно отраженном луче было невысоким.

3.1. Простой сигнал длиной один период

На рис. 2 представлено изображение, восстановленное методом ЦФА-Х по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования для 40 положений антенной решетки. Здесь и далее при

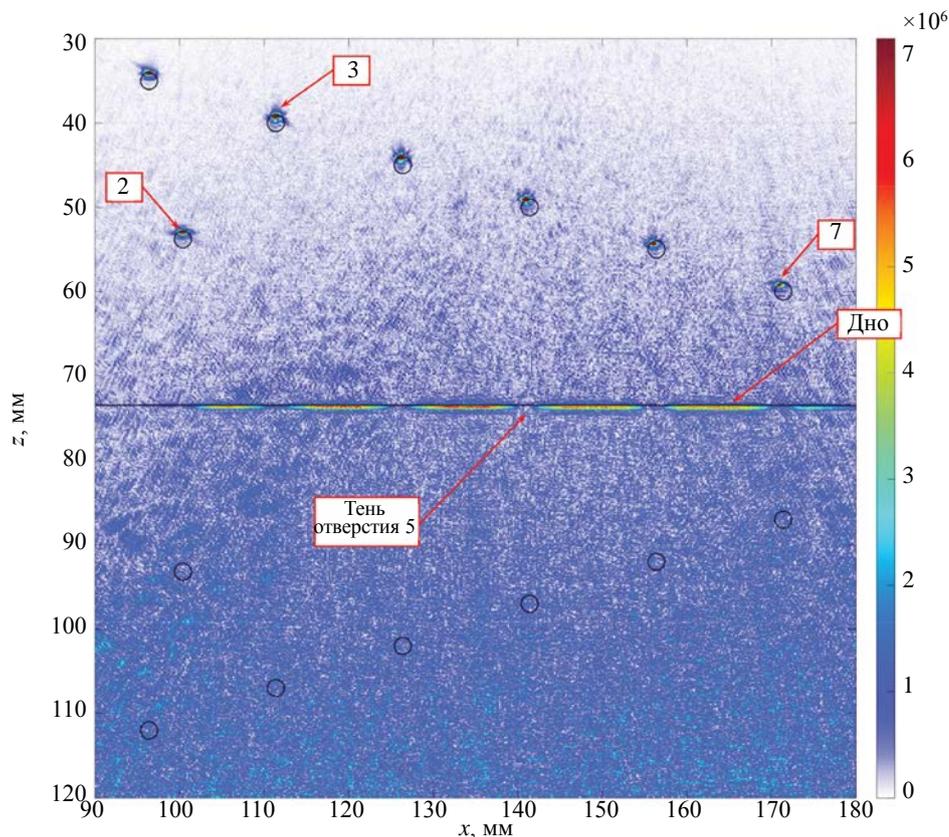


Рис. 2. Изображение отверстий бокового сверления при излучении простого сигнала длиной один период.

восстановлении изображения компенсировалось уменьшение амплитуды импульсов из-за расхождения лучевой трубки [22]. Для подчеркивания бликов малой амплитуды контрастность изображения установлена равной 0,25. Это означает, что цветовая кодировка амплитуд растрового изображения, превышающих 0,25 максимального значения изображения, не меняется и отображается темно-красным цветом. Высокий уровень затухания в плексигласе, малые размеры элементов антенной решетки и малая амплитуда зондирующего сигнала привели к тому, что блики отверстий после однократного отражения эхосигналов от дна обнаружить не удалось. Блики отражателей с номерами от 1 до 7 хорошо видны только на прямом луче в области, отмеченной на рис. 1 четырехугольником с границей красного цвета. На блике дна образца хорошо видны тени отверстий бокового сверления.

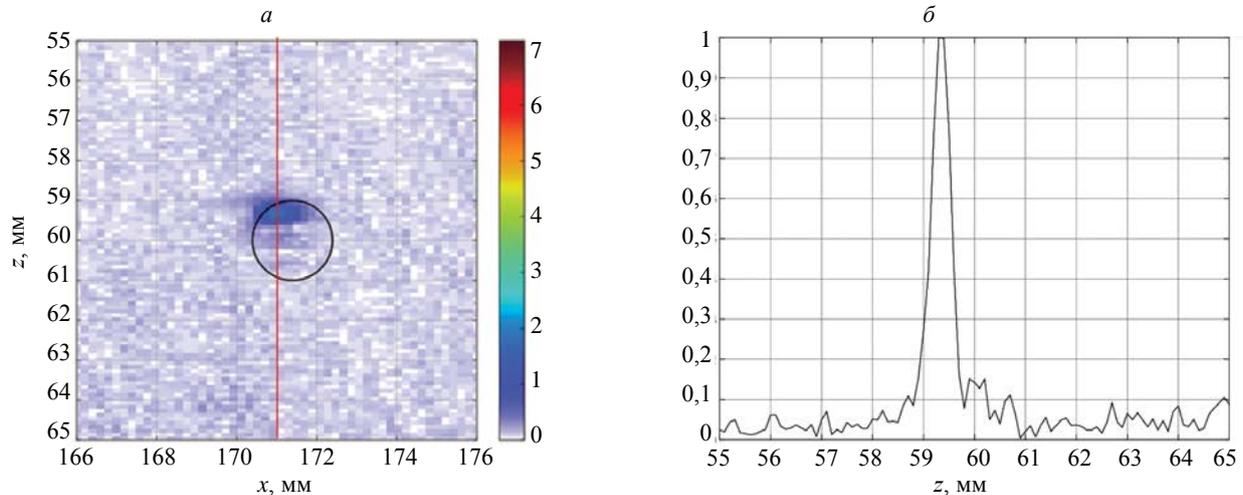


Рис. 3. Изображение отверстия 7 при однократном отражении от дна (а), срез изображения по оси z (б).

На рис. 3а показан фрагмент изображения на рис. 2, на котором уверенно обнаруживается блик самого глубокого отверстия 7, а на рис. 3б — его срез по оси z (линия красного цвета на рис. 3а). Отношение сигнал/шум изображения отверстия 7 на прямом луче можно оценить как 20 дБ.

3.2. Коды Касами длиной 15 периодов со случайной несущей, режим тройного сканирования

Для регистрации эхосигналов использовали $N_w = 20$ наборов из $N_c = 32$ фазоманипулированных согласно коду Касами длиной $N_c = 15$ сигналов. Каждый период имел частоту, распределенную в диапазоне от 3 до 7 МГц по равномерному закону.

На рис. 4 графиком черного цвета показан идеальный зондирующий импульс, синего — импульс, пропущенный через полосовой фильтр, а эхосигнал, отраженный от дна плексигласового образца толщиной 30 мм, — красного. Видно, что ограниченная полоса пропускания антенной решетки искажает идеальный вид зондирующего сигнала: в принятом эхосигнале фактически пропали резкие скачки фазы при смене чипа, амплитуда сигнала меняется от чипа к чипу.

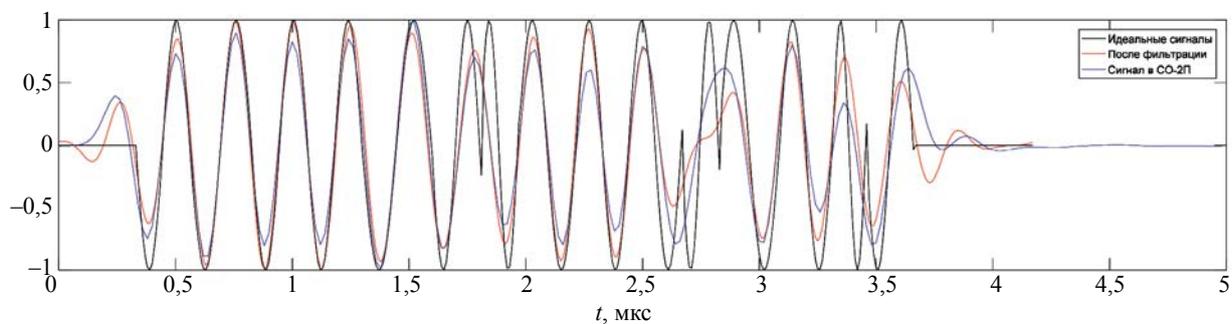


Рис. 4. Пример идеального зондирующего импульса (график черного цвета), зондирующего импульса, пропущенного через полосовой фильтр (красного), и измеренного эхосигнала (синего).

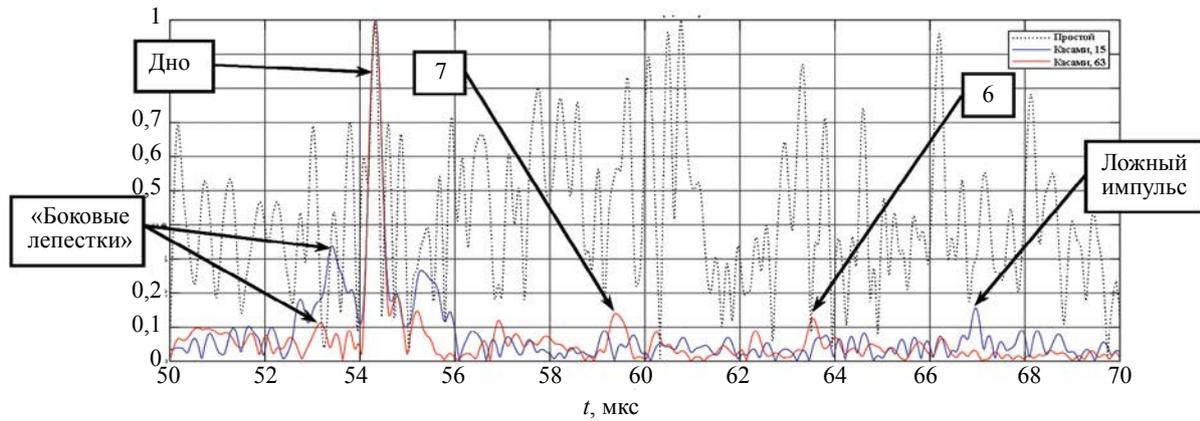


Рис. 5. Огибающая эхосигнала при излучении простого сигнала (график черного цвета из точек), огибающая сжатого эхосигнала при излучении сложного зондирующего импульса, фазоманипулированного согласно коду Касами длиной 15 (синего), результат сжатия эхосигнала при использовании кодов Касами длиной 63 (красного цвета).

На рис. 5 показана огибающая эхосигнала при излучении простого зондирующего сигнала длиной один период (график черного цвета из черных точек) и огибающая эхосигнала, сжатого с помощью фазовой коррекции согласно (1), при излучении зондирующего импульса, фазоманипулированного согласно коду Касами, длиной 15 (синего). Графиком красного цвета показан результат сжатия сложного эхосигнала при использовании кода Касами длиной 63, отношение сигнал/шум эхосигнала — простого зондирующего сигнала около 0 дБ, что делает невозможным визуальное обнаружение даже эхосигнала, отраженного от дна образца СО-1. Использование кодов Касами длиной 15 позволяет уверенно обнаружить эхосигнал, отраженный от дна образца СО-1. Однако обращает на себя внимание высокий уровень «боковых лепестков» сжатого сигнала. Только после излучения сложного сигнала, сформированного согласно коду Касами длиной 63, эхосигналы отверстий бокового сверления с номерами 6 и 7 при однократном отражении импульса

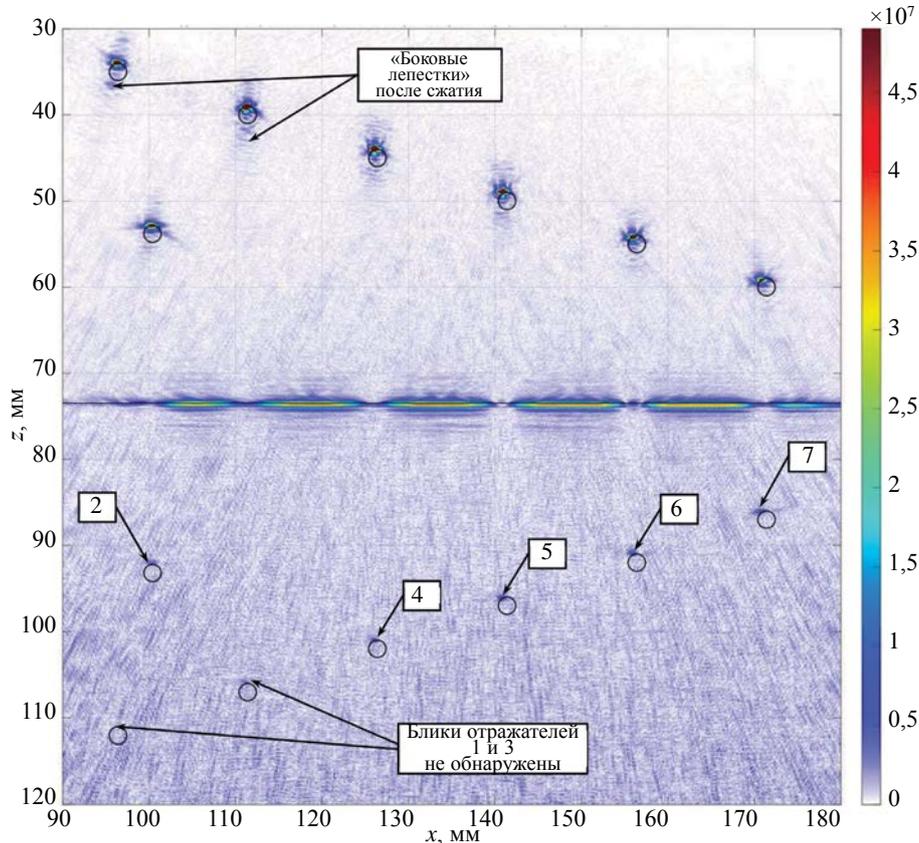


Рис. 6. Изображение отверстий бокового сверления при излучении фазоманипулированного сигнала согласно кодам Касами длиной 15.

от дна образца СО-1 стали более заметны, а уровень «боковых лепестков» уменьшился до приемлемого уровня -20 дБ от амплитуды импульса, отраженного от дна. Амплитуда «боковых лепестков» при использовании кода Касами длиной 15 больше амплитуды «боковых лепестков» при использовании кода Касами длиной 63 примерно на 9 дБ.

На рис. 6 показано ЦФА-Х-изображение, восстановленное по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования для 40 положений антенной решетки. Для подчеркивания бликов малой амплитуды контрастность изображения установлена равной 0,25. Сжатие измеренных сложных сигналов происходило за счет фазовой коррекции спектров идеальных зондирующих импульсов согласно (1). Около бликов отражателей большой амплитуды, восстановленных по эхосигналам на прямом луче, заметны «боковые лепестки». Уровень шума понизился не меньше, чем на 6 дБ по сравнению с изображением на рис. 2, что позволило обнаружить блики отражателей с номерами от 2, 4, 5, 6 и 7, сформированные эхосигналами, однократно отраженными от дна. Аналогичные блики отверстий номеров 1 и 3 достоверно обнаружить не удалось. Отметим, что никакой дополнительной обработки изображения не проводилось.

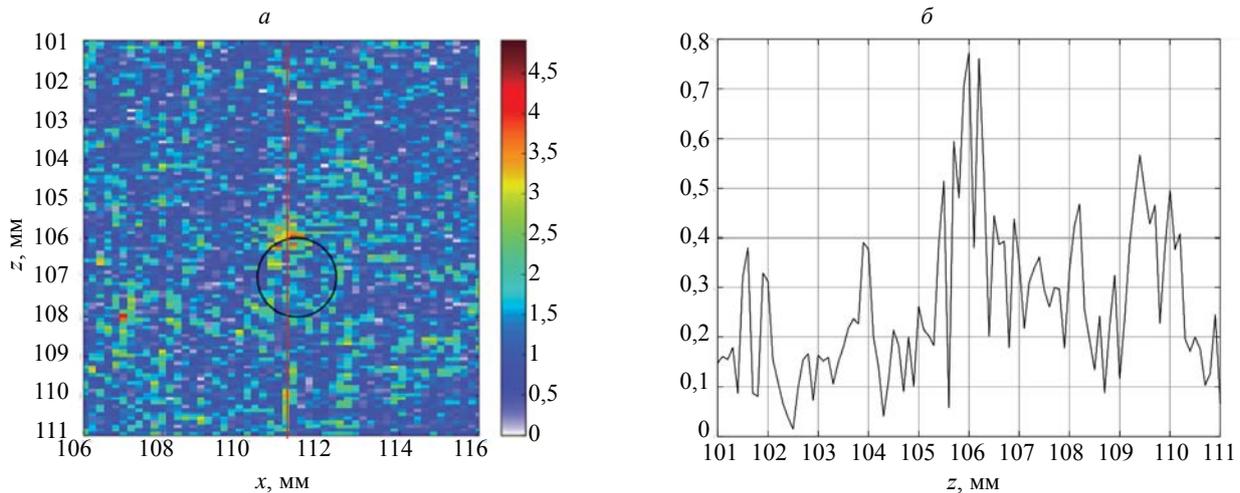


Рис. 7. Изображение отверстия 3 при однократном отражении от дна (а), срез изображения по оси z (б).

На рис. 7а показан фрагмент изображения на рис. 6 с бликом отверстия 3 при однократном отражении эхосигнала от дна, а на рис. 7б — его срез по линии красного цвета. Невысокое отношение сигнал/шум изображения отверстия 3 не позволяет считать отражатель достоверно обнаруженным.

3.3. Коды Касами длиной 63, режим двойного сканирования

Для регистрации эхосигналов использовали $N_w = 20$ наборов из $N_e = 32$, фазоманипулированных согласно коду Касами длиной $N_c = 63$ сигналов. Несущая частота каждого периода была равна 5,0 МГц.

На рис. 8 показано ЦФА-Х-изображение, восстановленное по эхосигналам, измеренным в режиме тройного сканирования для 40 положений антенной решетки. Контрастность изображения установлена равной 0,25. Сжатие измеренных сложных сигналов происходило за счет фазовой коррекции спектров идеальных зондирующих импульсов согласно (1). Около бликов отверстий, восстановленных по эхосигналам на прямом луче, заметны «боковые лепестки», которые из-за увеличения длины кода стали более протяженными по сравнению с рис. 6. Уровень шума понизился не меньше, чем на 6 дБ по сравнению с изображением на рис. 6. Однако блик отверстия номер 1 при однократном отражении эхосигналов от дна обнаружить по-прежнему не удалось. Большой уровень «боковых лепестков» бликов отражателей у поверхности объясняется тем, что чем глубже расположен отражатель, тем с больших положений антенной решетки регистрируются эхосигналы от него и тем большее количество кодовых комбинаций участвуют в его формировании. Поэтому уровень «боковых лепестков» блика отверстия 3 больше, чем у блика отверстия 7.

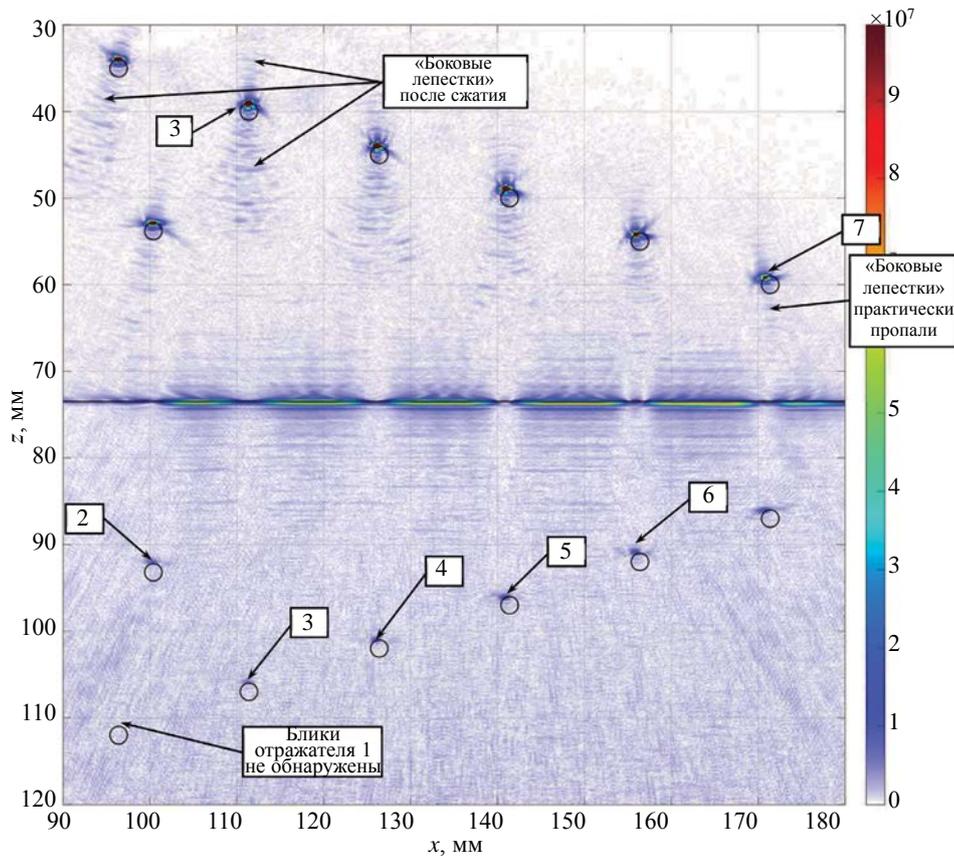


Рис. 8. Изображение отверстий бокового сверления при излучении фазоманипулированного сигнала согласно кодам Касами длиной 63.

На рис. 9а показан фрагмент изображения на рис. 8 с бликом отверстия 3, восстановленного при однократном отражении эхосигнала от дна, а на рис. 9б — его срез по линии красного цвета. Отношение сигнал/шум изображения отверстия 3 можно оценить как 12 дБ (см. для сравнения рис. 7), что позволяет считать отражатель обнаруженным.

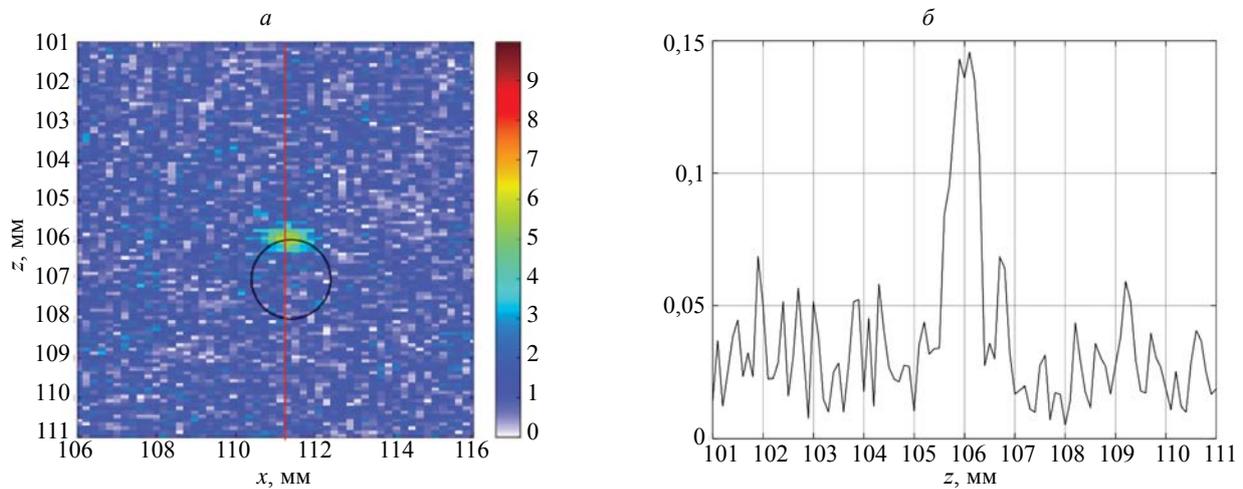


Рис. 9. Изображение отверстия 3 при однократном отражении от дна (а), срез изображения по оси z (б).

Как упоминалось ранее, сжатие сложных эхосигналов можно проводить с помощью метода МЭ. На рис. 10 показаны огибающая эхосигнала дна образца СО-1 при излучении простого зондирующего сигнала длиной один период (график из черных точек), огибающая сигнала, сжатого

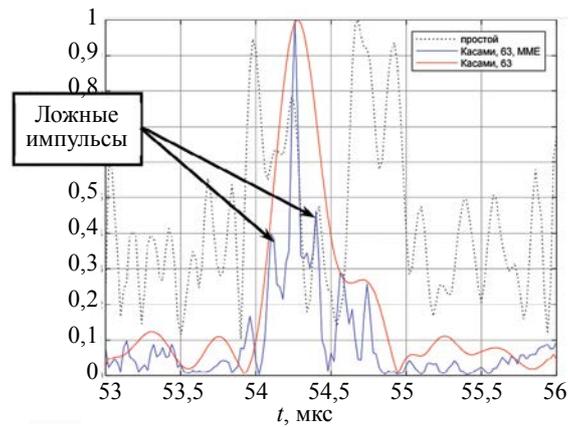


Рис. 10. Огибающая эхосигнала, отраженного от дна образца СО-1 при излучении простого зондирующего сигнала длиной один период (график из черных точек), огибающая сигнала, сжатого фазовой фильтрацией (график красного цвета), и огибающая эхосигнала при сжатии методом МЭ (синего).

фазовой коррекцией (график красного цвета), и огибающая эхосигнала при сжатии методом МЭ (синего). Видно, что МЭ-импульс уменьшил свою длину до 0,08 мкс, что примерно в пять раз меньше, чем ширина импульса при сжатии за счет фазовой коррекции согласно (1). К сожалению, после сжатия эхосигналов методом МЭ появились ложные импульсы, амплитуда которых составляет примерно 45 % от амплитуды основного импульса. В [23] рассмотрена причина появления ложных импульсов и предложен способ их устранения. Для этого нужно уметь рассчитывать форму эхосигнала $s_n(t, z)$ от точечного отражателя на глубине z с учетом формы зондирующего импульса $s_n(t)$, частотной характеристики электронной части измерительной системы, резонансных свойств антенной решетки и дисперсии, влияние которой на форму сигнала в образце СО-1 велико.

На рис. 11а показано ЦФА-изображение отверстия 3, восстановленного на прямом луче по эхосигналам, сжатым с помощью коррекции фазы, а на рис. 11б — его срез по линии красного цвета. Уровень «боковых лепестков» после сжатия с помощью коррекции фазы равен примерно -28 дБ, но даже при таком малом их уровне они достаточно заметны на рис. 11.

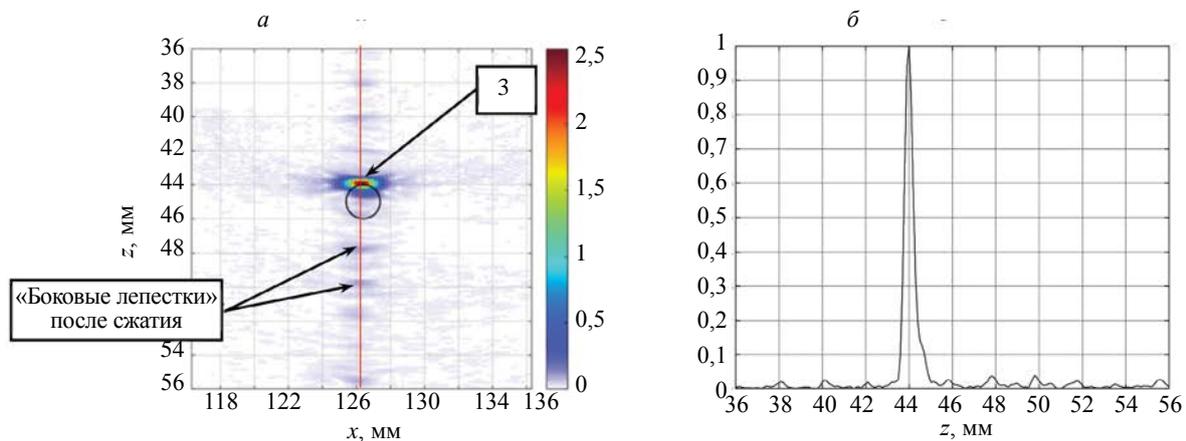


Рис. 11. ЦФА-изображение отверстия 3, восстановленное по эхосигналам, сжатым с помощью коррекции фазы.

На рис. 12а показано ЦФА-изображение отверстия 3, восстановленного на прямом луче по эхосигналам, сжатым с помощью метода МЭ, а на рис. 12б — его срез по линии красного цвета. Уровень «боковых лепестков» уменьшился примерно до -40 дБ, а лучевая разрешающая способность повысилась примерно в два раза. Такое небольшое повышение связано с тем, что ложные импульсы (см. рис.10) усредняются для всех 1024 эхосигналов, участвующих в формировании изображения.

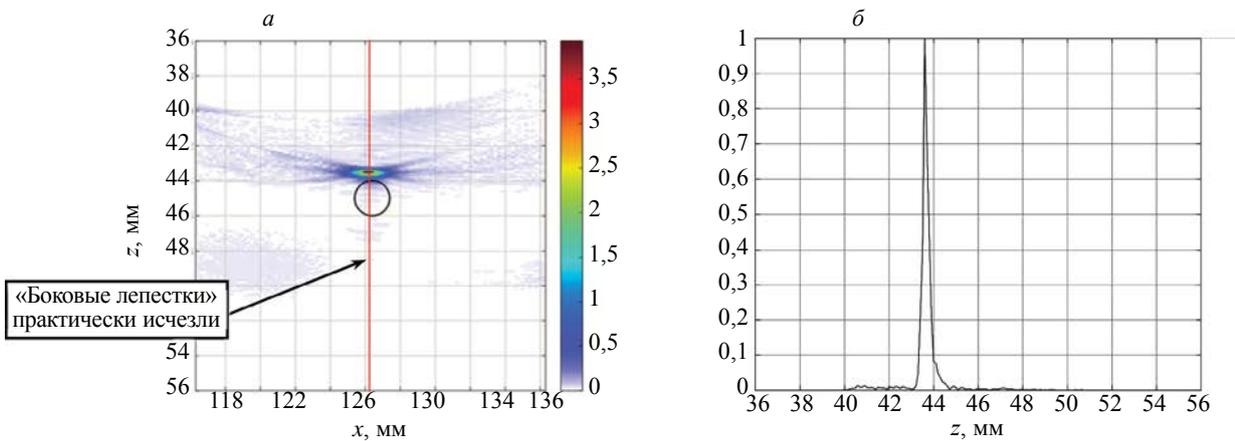


Рис. 12. ЦФА-изображение отверстия 3, восстановленное по эхосигналам, сжатым с помощью метода МЭ для одного положения антенной решетки.

К сожалению, сжатие эхосигналов методом МЭ не позволило заметно повысить отношение сигнал/шум бликов отверстий боковых сверлений, восстановленных по эхосигналам, однократно отраженных от дна образца СО-1. Возможно, это связано с тем, что необходимо использовать при сжатии методом МЭ не сигналы $s_n(t)$, а сигналы $s_n(t, z)$, учитывающие частотные особенности тракта используемой для регистрации аппаратуры и дисперсию.

ВЫВОДЫ

По результатам исследований, изложенных в данной статье, можно сделать следующие выводы.

1. Предложенный в данной работе метод повышения отношения сигнал/шум за счет использования псевдоортогональных кодовых последовательностей продемонстрировал свою эффективность:

отношение сигнал/шум ЦФА-Х-изображения при использовании кодов Касами длиной 63 возросло на 16 дБ по сравнению с вариантом использования простого сигнала длиной в один период. Применение кодов Касами позволило обнаружить на ЦФА-Х-изображении блики отверстий, восстановленные по эхосигналам, отраженным от дна образца СО-1;

уровень «боковых лепестков» ЦФА-Х-изображения при использовании кодов Касами стал меньше –20 дБ.

2. Сжатие сложных эхосигналов методом МЭ позволило уменьшить уровень «боковых лепестков» до –40 дБ, и повысить лучевую разрешающую способность примерно в два раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications // Publisher: Waltham, MA: Olympus NDT, 2007. <http://www.olympus-ims.com/en/books/> (дата обращения: 05.02.2019).
2. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач ультразвукового контроля опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1. С. 64—70.
3. Базулин Е.Г., Вопилкин А.Х., Тихонов Д.С. Повышение достоверности ультразвукового контроля. Часть 1. Определение типа несплошности при проведении ультразвукового контроля антенными решетками // Контроль. Диагностика. 2015. № 8. С. 7—22.
4. Базулин Е.Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51—75.
5. Ковалев А.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г., Яковлев Н.Н. Импульсный эхо-метод при контроле бетона. Помехи и пространственная селекция // Дефектоскопия. 1990. № 2. С. 29—41.
6. Базулин Е.Г. О возможности использования в ультразвуковом контроле двойного сканирования для повышения качества изображения рассеивателей // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 741—745.
7. Chatillon S., Fidhoussen A., Iakovleva E., Calmon P. Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / NDT National Conference, Aug 25—27, 2009. Canada.

8. *Bolotina I., Dennis M., Mohr F., Kröning M., Reddy K.M., Zhantlessov Y.* 3D Ultrasonic Imaging by Cone Scans and Acoustic Antennas / 18th World Conference on Nondestructive Testing, 16—20 April 2012. Durban. South Africa.

9. *Базулин Е.Г.* Восстановление изображения отражателей методом C-SAFT с учетом анизотропии материала объекта контроля // Дефектоскопия. 2015. № 4. С. 42—52.

10. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.

11. *Базулин Е.Г., Коколев С.А.* Повышение отношения сигнал/шум при проведении ультразвукового контроля ремонтных заварок с использованием технологии прореженных антенных решеток // Дефектоскопия. 2013. № 5. С. 45—58.

12. *Качанов В.К.* Применение ортогональных фазоманипулированных сигналов в УЗ дефектоскопии // Дефектоскопия. 1990. № 9. С. 39—46.

13. *Качанов В.К., Карташев В.Г., Соколов И.В., Шалимов Е.В.* Методы обработки сигналов в ультразвуковой дефектоскопии / Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлениям «Электроника и микроэлектроника», «Радиотехника». М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 220 с.

14. *Golay M.J.E.* Complementary series // IRE Trans., Inf. Th. 1961. V. IT-7. No. 2. P. 82—87.

15. *Kasami T.* Weight Distribution Formula for Some Class of Cyclic Codes // Tech. Report No. R-285, Univ. of Illinois. 1966. April.

16. *Gold R.* Optimal binary sequences for spread spectrum multiplexing // IEEE Transactions on Information Theory. 1967. October. V. 13 (4). P. 619—621. DOI:10.1109/TIT.1967.1054048.

17. *de Bruijn N.G.* A combinatorial problem // Koninklijke Nederlandse Akademie v. Wetenschappen. 1946. V. 49. P. 758—764.

18. *Chu D.C.* Polyphase codes with good periodic correlation properties // IEEE Trans. Inform. Theory. July. 1972. P. 531-532. DOI:10.1109/TIT.1972.1054840.

19. *Базулин А.Е., Базулин Е.Г.* Деконволюция сложных эхосигналов методом максимальной энтропии в ультразвуковом неразрушающем контроле // Акуст. журн. 2009. № 6. С. 772—783.

20. *Zigangirov K.Sh.* Theory of Code Division Multiple Access Communication. N.-Y. IEEE Press, 2004. 412 p.

21. Официальный сайт фирмы «ЭХО+» URL: <http://www.echoplus.ru> (дата обращения: 05.02.2019).

22. *Базулин Е.Г.* Использование метода инверсного C-SAFT для выравнивания пространственной чувствительности изображения отражателей // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 58—71.

23. *Базулин Е.Г., Вовк А.С.* Применение метода максимальной энтропии в ультразвуковой дефектоскопии с учетом переменной формы эхосигнала // Научные труды МЭИ. 2018. № 5. С. 111—119.